

修 士 論 文

パフォーマンスを拡張するメディアデバイスの開発

平成 29 年度

指導教員 馬場 哲晃

(15893510)

小手川 誠也

首都大学東京大学院
システムデザイン研究科 博士前期課程
インダストリアルアート学域

提出日：平成 30 年 1 月 25 日

パフォーマンスを拡張するメディアデバイスの開発

要旨

近年、物や人の動きをセンサやカメラでメディア変換し、映像や光にリアルタイムで反映させるインタラクティブな演出が多く見られる。舞台上で演者の動きをセンサで読み取り映像や光に反映させる舞台演出や、鑑賞者が簡易に体験可能なインスタレーション型展示空間等、身体や空間におけるパフォーマンスを拡張する手法は様々である。従来行われてきた非対話的なプログラムを再生するだけの映像や光の表現だけでなく、センサの性能向上や小型化など電子部品が容易に扱えるようになり、リアルタイムに現実世界の動きを反映させるインタラクティブな表現が可能となった。

また、センサを用いた取り組みとしてスポーツや日常における動作の解析をおこなう取り組みも盛んに行われている。スポーツ選手の動作をセンサでメディア変換し、データを分析することで改善点を見つけスポーツパフォーマンスの向上を目指す取り組みや、スポーツ選手に限らずスマートフォンや Apple watch などのセンサが内蔵された電子機器を持ち歩くことで、移動経路やユーザーの状態のデータを集め解析し、健康面の向上やトレーニングの意識向上に生かす取り組みなど用途はさまざまである。状態認識や動作解析は、日常の生活の質向上やスポーツパフォーマンスの向上に生かすことが期待できるため、今後も様々な身体動作に関して研究が進んでいくことが見込まれる。解析手法や解析したデータをどのように生かすかがとても重要な点である。

そこで本研究では、上記の二つに着目し動作解析をパフォーマンス拡張に応用することで、動作に対応したアウトプットが可能なメディアデバイスの開発をおこなった。著者が親しんできたスケートボードに9軸モーションセンサを取り付けトリックを行うことでトリックのデータを集め、そのデータを元に複数のトリックの動作解析をおこない動作ごとの特徴を得た。また、その特徴を用いて動作認識をし、動作に対応した3DグラフィクスとLEDによるアウトプットをリアルタイムにおこなうことでパフォーマンスの拡張を行う。

制作の進め方としては、はじめにトリックの動作解析のためにセンサ値と動画像を同時に記録可能なアプリケーションの制作を行った。著者らの所属研究室から起業したスタートアップ企業 nnf(no new fork studio) 社が制作した Orphe のコアモジュールを用いて加速度、角速度、コンパス、またこれらから算出した、クオータニオン、角度を nnf 社

が制作した HUB アプリを經由してセンサの値を本アプリケーションに取得した。センサ出力タイミングと動画のタイミングを合わせる作業の手間や動画ファイルが重くなりアプリケーションの動作に支障をきたすことを考慮し、動画ではなく動画像を用いた。センサ取得タイミングと同時にアプリケーション上のカメラ映像のキャプチャを取得することで、データ容量を重くすることなくセンサ値と合わせて動画像を再生することを可能とした。次に、スケートボードの基本的なトリックである、オーリー、ショービット、チックタックに着目し、録画用のアプリケーションを用いて動作解析をおこない動作ごとの特徴やトリック時の共通の特徴を見出した。そして動作解析で得た特徴を生かして閾値と DTW を用いて認識に挑戦した。トリック認識の知見を生かし、スケートボード初学者のトリック上達支援アプリケーションの制作をおこなった。この初学者支援アプリケーションはセンサを取り付けたスケートボードでトリックをおこない録画することで自分の過去のデータや、プロのデータと比較し、自分のトリックの特徴や問題点を提示し上達に役立てることができる。また、本アプリケーションは LED モードを搭載し、LED をボードに取り付けることで動作ごとに光を変える演出も可能である。

また、首都大学東京の車椅子プロジェクトの一環として、本システムを用いて車椅子の動作解析、及びパフォーマンスの拡張にも取り組んだ。車椅子で日常的におこなえる動作である、走行、回転、叩打に着目し、スケートボード用に制作した録画アプリケーションを用いて各動作の記録と解析を行った。また、解析で得た特徴を用いて動作に連動してリアルタイムで音になり、3D グラフィクスが動くアプリケーションの制作をおこなった。制作したアプリケーションは iPad 上で再生可能なため、車椅子に iPad とセンサを取り付け一体化することで単体での動作が可能である。また、制作したアプリケーションを展示会に出展し多くの方に体験をしていただき高い評価を得た。

スケートボードと車椅子への二つの応用を通して、モーションセンサを取り付けることで競技、舞台、ダンス等において LED 演出を容易に実現可能なシステムを構築した他、学習支援システムとしての可能性を示した。改善点として、認識の成功度合いが動作や人によってばらつきがあるため、DTW に用いたテンプレートや認識手法の適切性のさらなる検討と、テンプレートデータを増やすことで誰にでも適応可能で精確な認識プログラムを制作する必要があると考えている。また、今回は認識を用いて光や音でのアウトプットを行なったが、映像表現など他のテクノロジーを用いたパフォーマンスへの応用も検討する。

本稿では，9 軸モーションセンサを用いた動作解析及び解析結果を用いたパフォーマンスの拡張をスケートボードと車椅子に応用した事例を報告する．

Developing Media Device to Expand Performance

Summary

In this research, we developed the system of performance extension by outputting digital expression interlocking movements real-timely. Furthermore, we made performance extension application for skateboarding by using this system. The procedures is ,at first, we convert to media information and analysis movements of skateboard trick by attaching 9-axis motion sensor to skateboard. using the features getting from the analysis, we made the application for beginner of skateboard.

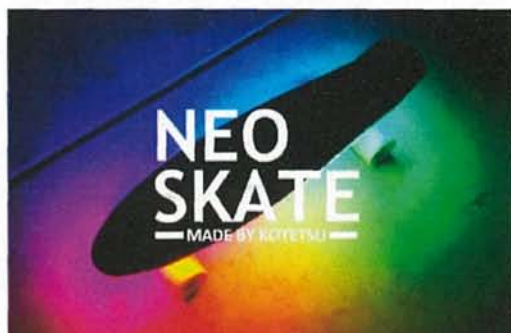
In addition, we applied this system to wheelchair, movements everyday , run , rotate, beat to armrest record and analysis each movements. using analysis , we made the application moving 3d graphics and sound interlocking movement of wheelchair. and exhibit the exhibition in Tokyo and this application are experienced by many people.

目次

要旨	i
Summary	iv
1 序論	1
2 走行パフォーマンス表現の拡張	2
2.1 テクノロジーを用いたパフォーマンス表現	2
2.2 スケートボードが持つパフォーマンス表現力	3
2.3 先行研究	3
2.4 《NEO SKATE》の開発	4
2.4.1 スケートボード基本情報	4
2.4.2 システム概要・予備実験	5
2.4.3 実装	7
3 トリックパフォーマンス性能の拡張	8
3.1 スポーツや日常における動作解析	8
3.2 先行研究	9
3.3 《NEOSKATE2》の開発	10
3.3.1 システム概要	12
3.3.2 動作解析	17
3.3.3 アプリケーション制作	22
4 車椅子への応用事例	28
4.1 車椅子基本情報	28
4.2 先行研究	28
4.3 《NEO WHEEL CHAIR》の開発	29
4.3.1 システム概要	29
4.3.2 動作解析	31
4.3.3 アプリケーション制作	38
4.3.4 展示	39
5 展望	40
6 結論	42
付録 A 学外発表	45

1 序論

まず，本研究においてパフォーマンスという言葉は，表現という意味と，スポーツや身体動作の性能という二つの意味として扱うため，表現としてのパフォーマンスをパフォーマンス表現と呼び，身体動作の性能としてのパフォーマンスをパフォーマンス性能と呼ぶこととする．本研究では，スケートボードの走行状態を LED に反映させた《NEO SKATE》，モーションセンサを用いてトリックの動作を解析し，上達支援を行う《NEO SKATE2》，NEO SKATE2 のシステムを車椅子に応用した，《NEO WHEEL CHAIR》の3つを制作した．これよりこの3つの作品概要や制作過程について報告する．



走行パフォーマンス表現拡張



トリック上達支援アプリケーション



車椅子操作拡張アプリケーション

図1 制作した3つの作品

2 走行パフォーマンス表現の拡張

2.1 テクノロジーを用いたパフォーマンス表現

近年、物や人の動きをセンサやカメラでメディア変換し、映像や光にリアルタイムで反映させるインタラクティブな演出が多く見られる。Rhizomaticsが行なっている舞台上で演者の動きをセンサで読み取り映像や光に反映させる舞台演出や、teamLabが行なっている客がその場で参加可能な演出など、身体や空間におけるパフォーマンスを拡張する手法は様々である(図2)。従来はボタンの押下や決められた現象をきっかけに事前に用意したプログラムを再生する表現が主流であった。そのため、パフォーマンスとタイミングを合わせる必要性や、予想しない動きには対応できずパフォーマンスにズレが発生し違和感が発生するなどの問題点があった。しかし、近年のセンサの性能向上や小型化など電子部品は多くの人が容易に扱えるようになり、IoT製品の開発などあらゆる分野でセンサを用いたインタラクティブな取り組みが行われるようになった[1]図3。これに伴いパフォーマンス表現も変化し、リアルタイムに動きを反映させることが可能となり、演者のその時の動きに対応したデジタル表現が可能となったのだ。その他にも、ユーザの位置や指の位置、体の形など、そのユーザから得られるオリジナルな情報をデジタル表現に反映することで、より没入感のあるパフォーマンスが可能となった。センサを用いてインタラクティブにすることで、従来のやり方に新しい価値を付加し新しい体験を生み出すことができる。

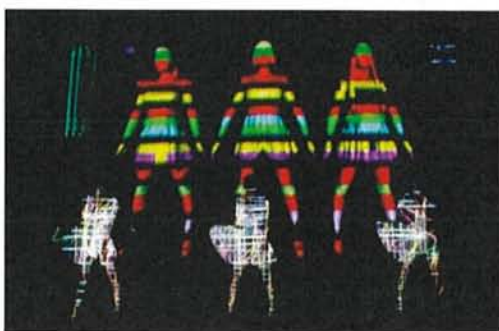


図 2 perfume の演出引用
元:<https://research.rhizomatiks.com/works/>

	2000	2010	2020 (?)
MEMS die size (mm ²)	10 mm ²	~2-3 mm ²	1-2 mm ²
Packaged die size	2x5x5 mm ³	QFN package (3.0 mm x 3.0 mm, height 0.9 mm)	< 1x2x2 mm ³
Power consumption	0.1 mW	0.05 mW	< 0.05 mW
MEMS ASP (\$)	>\$3 (3-axis)	\$0.70	<\$0.50
Volume (M units)	35	771	> 2,500
Major manufacturing evolution	<ul style="list-style-type: none">• 4" & 6" wafer size• Integrated MEMS from AD• Mostly wire bonding side by side	<ul style="list-style-type: none">• 6" and 8" emerging• SOI wafers and epiPoly Si approaches (thick proof mass)• AD shifts to hybrid• Stacked/side by side wire bonded MEMS & ASIC	<ul style="list-style-type: none">• Mostly 8" wafer size• Capping is removed• ASIC = active capping• 3D TSV generally accepted

図3 センサの小型化を表す表

2.2 スケートボードが持つパフォーマンス表現力

スケートボードは一般に樹脂ボード又は合板に車輪が4つ備わっており、ユーザはこれに乗り、路上の走行やトリック等を楽しむ。近年のストリート文化において人気スポーツの一つである。ボードを一度買えば気軽に楽しめることから、若年層を中心に多くの人に楽しまれているスポーツである。その人気は着々と広がり2020年の東京オリンピックでは、初めて正式種目として選ばれた。オリンピックに向けてスケートボードの認知も広がり、ますます人気が高まっていくことが見込まれる。スケートボードはボードの回転や複数の技の組み合わせることによって多くのトリックをおこなうパフォーマンス性が高いスポーツである。また、トリックには平面でおこなうものや、手すりや障害物を利用するもの、半円状のカーブを利用するものなどトリックは様々である。そんなスケートボードの高いパフォーマンス性に着目しセンサとLEDを用いることで、パフォーマンスをさらに拡張し新しい表現を生み出そうと考えた。

2.3 先行研究

スケートボードのパフォーマンス表現の拡張を行なっている事例として、interactive mapping for sk8(図4[7])はランプと呼ばれる半円のステージに位置情報を反映させた映像をマッピングしパフォーマンス表現の拡張を行なっている。本研究では場所を限らずパフォーマンス表現の拡張ができることを目標としている。また、sunset skateboard(図5)は、回転を検知するとウィールに仕込まれたLEDが発光する商品であるが、本研究では動作に応じて光を変え、さらなるパフォーマンス表現の拡張を目指す。



図4 interactive mapping for sk8

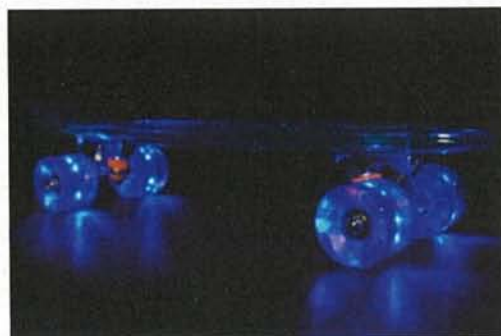


図5 sunset skateboard

2.4 《NEO SKATE》の開発

2.4.1 スケートボード基本情報

スケートボードは、主にウィール、デッキ、トラックの3つで構成されている。また、スケートボードの前方と後方にはそりがあり、大きく反り返っている方をノーズ(前方)、逆側をテール(後方)と呼ぶ。ウィールはハードウィールとソフトウィールがあり、ソフトウィール(柔らかいウィール)はトリックには向いていないが、地面の影響を和らげスピードを落とさないため走行に向いており、ハードウィール(硬いウィール)は、地面の凹凸の影響を受けやすく走行には向いていないが、ボードをジャンプや回転させるときに地面の影響を受けやすいため跳ね返りが良くトリックに向いている。また、デッキは、素材、大きさ、形により様々なボードや特徴があり、一般的には木でできたボードでトリックを行う。木のボードは複数の木をプレス機にかけて製造しているため、例えばオーリーというジャンプ技ではテールを叩きつけた際に複数の木の重なりがバネの作用をし高く跳ぶことができるなど、返しが強く跳ね返りが良いためトリックに使われている。プラスチックは、トリックよりも移動向けでありクルージングボードとも呼ばれ、木のボードよりも軽く、表面には木のボードではヤスリが貼られているのに対し、プラスチックは凹凸のデザインがなされているだけなので、持ち運び時に服やリュックに引っかからなく持ち運びに向いている。トラックはウィールとデッキをつなぐ部分の総称で、走行時の曲がり具合や手すりなどのレールを使うトリックでは引っ掛ける用途がある。トラックが大きいと走行が安定し、トリックの種類にもよるがトラックが小さいとトリックに向いていると言われている。

今回制作する《NEO SKATE》では、走行に向いたプラスチックのデッキで、大きさは22インチのボードを用いる。また、ウィールは同じく走行に向いているソフトウィールを用いた。



図6 スケートボード部品の説明



図7 使用したボードの説明

2.4.2 システム概要・予備実験

使用部品は速度と曲がり度合いの計測にフォトリフレクタ、アウトプット用にフルカラーLED、マイコンにarduino nanoを用いた(図8)。ウィールの回転はタイヤに白黒の印をつけ、周期を測ることで速度を算出した(図9)。また、曲がり度は曲がる時にボードが傾くため、ボードとウィールの距離を測ることでカーブの度合いを算出した(図10)。デバイスの破損を防ぐために、デバイス収納スペースを持ったスケートボードを3dモデルで制作し、3dプリンタで出力した。



フォトリフレクタ



arduino nano



フルカラーLEDテープ

図 8 使用部品

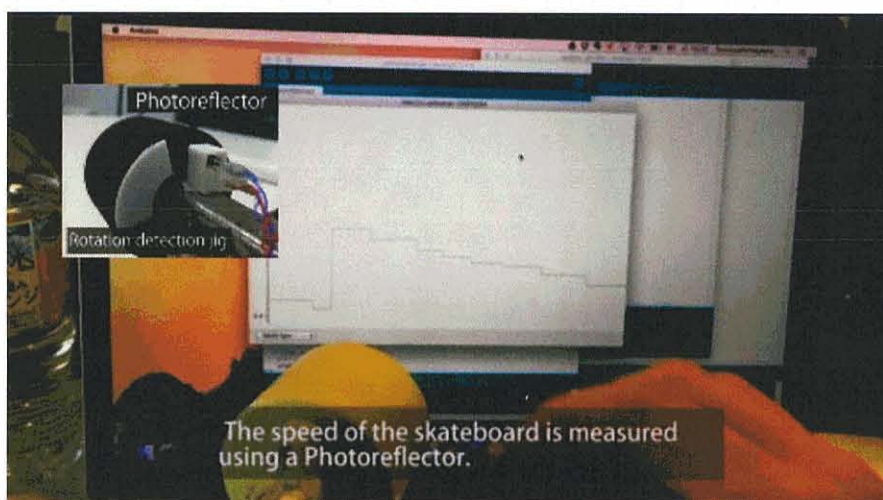


図 9 速度計測

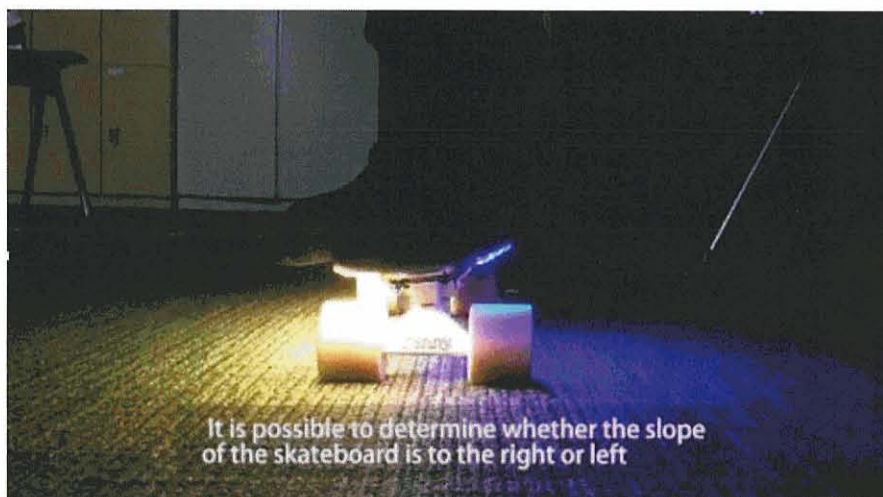


図 10 曲がり計測

2.4.3 実装

速度と曲がりの計測を用い、各動作に LED 発光パターンを対応させた。走行時には青い光を用い、速度により流れるスピードを変え、曲がる時は曲がる方向の LED を黄色に光らせ、停止時には後方を赤く光らせることで走行状態のパフォーマンス表現の拡張を行った。

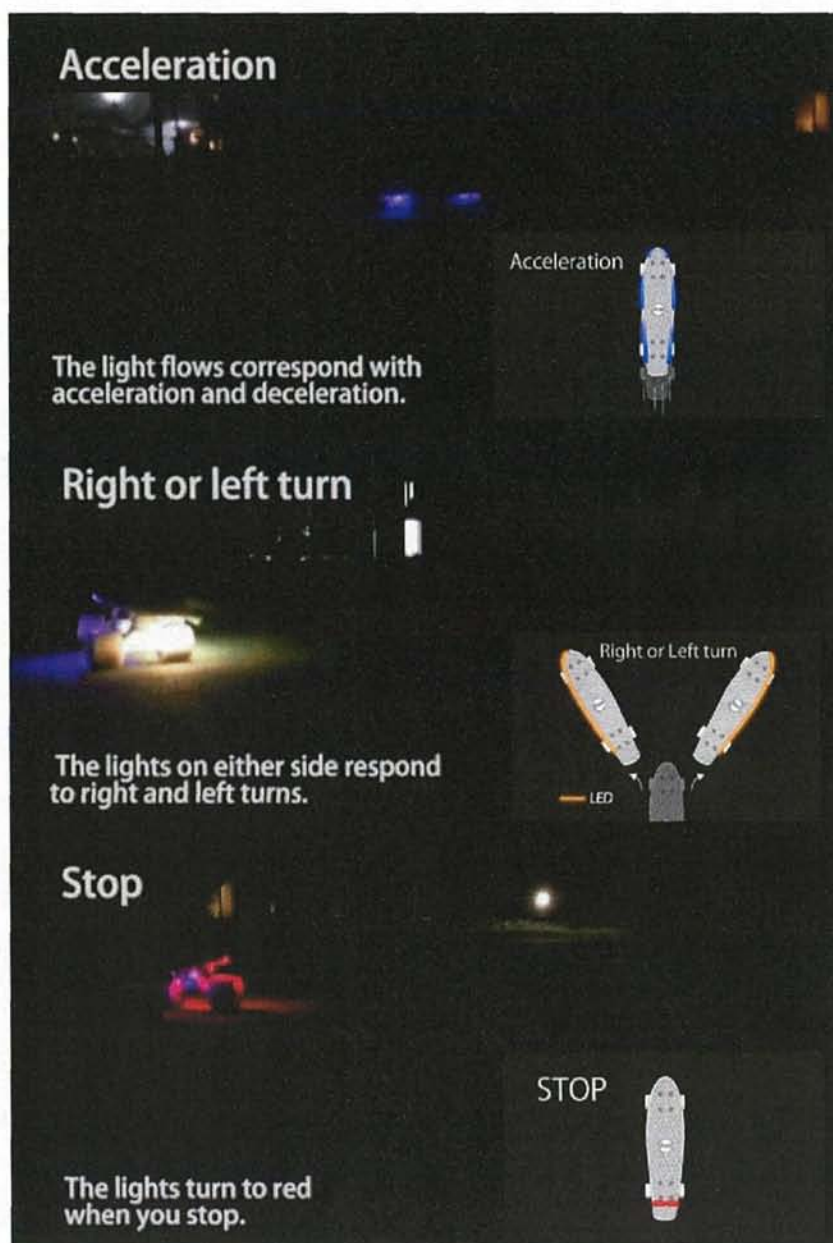


図 11 走行状態を LED 発光パターンで表している様子

3 トリックパフォーマンス性能の拡張

スケートボードには走行用とトリック用があるため、次にトリック用のスケートボードについて拡張をおこなう《NEO SKATE 2》の制作をおこなった。また、パフォーマンス性能の向上は、上達支援ともいえ、《NEO SKATE2》は上達支援をおこなうアプリケーションと位置づけた。トリック動作の認識をした後、動作解析をおこなうことで精度の高い上達支援を行おうと考えた。

3.1 スポーツや日常における動作解析

センサを用いた取り組みとしてスポーツや日常における動作の解析をおこないスポーツパフォーマンスや生活の質の向上に生かす取り組みも盛んに行われている。スポーツ時の動作を、カメラやセンサを駆使し分析することで、選手の活動量や筋疲労などの身体情報や、シュート位置、ポジショニングなどの座標把握、具体的な弱点や動きの癖などのパフォーマンス性能など、肉眼で見ただけでは分かり得ない情報が数値として精確に知ることができる。また、身体への負担の原因追求、予防すべき点の把握などの予防に役立てることも可能である。従来のスポーツ上達方法は、反復練習による慣れや言葉による感覚で理解するといった曖昧な情報でスキル習得を行なってきたが、センサを用いることで精確な数字で足りない部分を見られるため、原因の追求や改善が早く行えるのが利点である。

すでにプロのアメフト、サッカー、テニス、サッカーなどのスポーツでは、動作解析を用いたパフォーマンスの向上に向けた取り組みが行われており、近年では一般人向けにIoT製品としてセンサを用いた動作解析及びパフォーマンスの向上への取り組みも進んでいる。スマートフォンやApple Watchなどのセンサが内蔵された電子機器を持ち歩くことで、移動経路やユーザーの状態のデータを収集解析することで、健康面の向上やトレーニングの意識向上に生かす取り組みなど用途はさまざまである。スポーツ庁は5.5兆円の市場規模である日本のスポーツ産業の市場を2025年には約3倍の15.2兆円に拡大するとともに、その中の1.1兆円をIoT分野で占める目標をかかげている(図12)[2]。IoT分野は2012年時点の5.5兆円の中には含まれていないため、新規開拓の必要がある。スポーツ業界に限らず、IoTという分野はリーマンショック期以来の高水準を記録しており[?], IoT製品を制作する動きは現在ベンチャー企業を中心に幅広いジャンルで開発が行われて

いる。

状態認識や動作解析は、日常の生活の質向上やスポーツパフォーマンスの向上に生かすことが期待できるため、今後も様々な身体動作に関して研究が進んでいくことが見込まれる。新しい体験を生み出すためには、解析手法や解析したデータをどのように生かすかがとても重要な点である。

我が国スポーツ市場規模の拡大について【試算】			
(単位：兆円)			
スポーツ産業の活性化の主な政策		現状※1	2020年
(主な政策分野)	(主な増要因)	5.5兆円	10.9兆円
①スタジアム・アリーナ	▶ スタジアムを核とした街づくり	2.1	3.0
②アマチュアスポーツ	▶ 大学スポーツなど	-	0.1
③プロスポーツ※2	▶ 興行収益拡大（観戦者数増加など）	0.3	0.7
④周辺産業※2	▶ スポーツツーリズムなど	1.4	3.7
⑤IoT活用	▶ 施設、サービスのIT化進展とIoT導入	-	0.5
⑥スポーツ用品	▶ スポーツ実施率向上策、健康経営促進など	1.7	2.9
			15.2兆円

図 12 スポーツ庁によるスポーツ産業規模拡大の指針

3.2 先行研究

動作解析はプロのスポーツ業界を中心に多く行われている。選手の身体情報や、ポジションやシュート位置、など各スポーツの特性に合わせてセンサを駆使し、分析をおこなっている。また、近年では一般向けに IoT 製品としてセンサを用いた動作解析をおこなう取り組みも進んでおり、スマートフォンや apple watch などのセンサが内蔵された電子機器を持ち歩くことで、移動経路やユーザーの状態のデータを収集解析することで、健康面の向上やトレーニングの意識向上に生かす取り組みなど用途はさまざまである。

smart watch や apple watch などの IoT 製品 は加速度センサを搭載し、歩数や歩行距離などの歩行情報、走行速度や走行時間などの走行情報、睡眠時間や睡眠状態などの睡眠情報など日常における活動の解析をおこない、生活の質の改善の手助けをするウェ

アラブルデバイスである (図 13)。このように動作解析はアスリート向けから一般向けまで多岐にわたり、より良いパフォーマンスをおこなうための手がかりとして利用されている。

スケートボードのパフォーマンス性能の拡張を図っているものとして Reynell らは [5] スケートボードに Bluetooth 及び 9 軸センサを搭載し、スケートボードの状態や GPS を利用しスケートボード体験の向上を狙ったシステムを提案している。DesignI/O による Skataviz は ボードに取り付けた iphone のセンサを用いてスケートボードの動きをメディア変換し、pc にて可視化を行い上達に役立てるシステムを開発している (図 14)[6]



図 13 apple watch

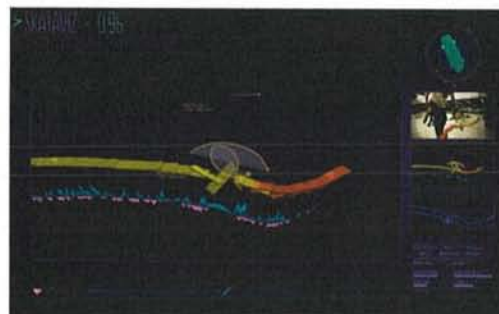


図 14 skataviz で録画したデータを可視化している様子

3.3 《NEOSKATE2》の開発

スケートボードトリックには、半円状のランプと呼ばれるカーブを用いて技を行う〈ランプトリック〉、スケートパークにある箱形のセクションや、ストリーートの縁石やハンドレール (手すり) などでスケートボードをスライド/グライドさせる〈レールトリック〉、平らな地面で技をおこなう〈グラウンドトリック〉がある。今回はグラウンドトリックに焦点を絞り研究をおこなう 15. グラウンドトリックはトリック前のスタンス (立ち方) やボードの縦回転や横回転を組み合わせることで、トリックを行う。スケートボードの初心者 は基礎の動きである、ボードの上に立つことやスタンス (立ち方)、次にプッシュ (走行のために地面を押す動作) や左右に移動するための重心移動、ストップを学び、基本を習得したのちにトリックの練習をおこなう。その中でもオーリー、チックタック、ショービットはトリックの基礎とされており、この3つをマスターし派生して行くことで様々な技に応用できる。

デッキはトリックに向いている木のデッキで、大きさは一般的な 8.0 インチを用いる。
また、ウィールは同じくトリックに向いているハードウィールを用いる。



図 15 トリックの種類や使用したボードの説明

本研究では動作解析を用いて動作の特徴を得ることで、リアルタイムに動作の認識をおこないパフォーマンスの拡張をおこなう。

制作の進め方としては、

- ① 録画再生アプリケーションによる動作の記録
- ② 動作解析で得た特徴を生かした動作認識

③ 動作認識を用いて動作に連動したアウトプットの順番でおこなった。図 16 に制作の流れを示す。

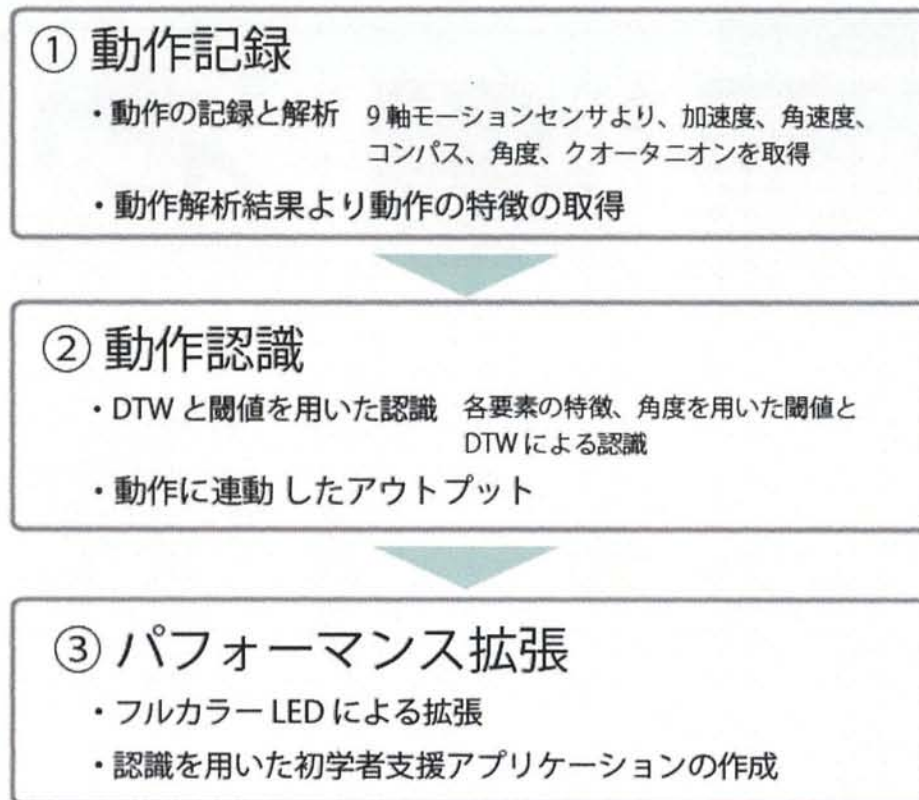


図 16 本研究のシステム制作の流れ

3.3.1 システム概要

■ハードウェア 現状のシステムではトリック時のボードの回転などの詳細な動きがとれないために、センサーを距離センサからモーションセンサに、スケートボードを走行用からトリック用に変えた。ハードウェアは著者らの所属研究室から起業したスタートアップ企業 nnf(no new fork studio) にて開発した、スマートシューズ Orphe 用のワイヤレス 9 軸モーションセンサモジュールを利用した。orphe は 9 軸モーションセンサと bluetooth を搭載したスマートシューズ (図 17) で、スマートフォンやパソコンと接続することで、音や光で足の動きに連動したアウトプットができる。また、無償配布の SDK を利用して、対応アプリケーションを開発することで、ダンス、音楽、ヘルスケア、VR/AR と誰

でも靴を用いた新しいシステムを構築することが可能である。本研究では素早い動きに対応できる orphe のコアモジュールを用いて制作を進めた (図 18)。モジュールはボード下部中央に養生テープで取り付けた。なお、ジャンプなどの衝撃を和らげるため、ボードとモジュールの間にクッションを挟んでいる (図 19)。

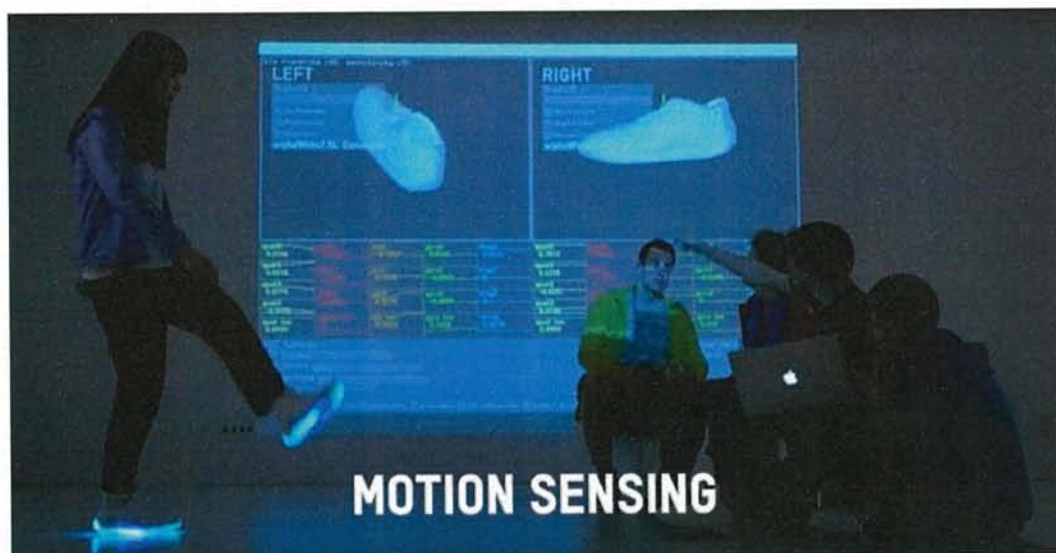


図 17 orphe を用いて動作をメディア変換し可視化をしている様子



図 18 orphe コアモジュール



図 19 スケートボードにモジュールを取り付けた様子

ボードに取り付けたモジュールに実装された 9 軸モーションセンサより加速度 (Acceleration:acc[m/s²]) 角速度 (Angular velocity:gyro[rad/s]), コンパス (Compass), またこれらを利用し各軸ごとのクオータニオン (Quaternion), 角度 (Angle[rad]) を HUB アプリ (図 21) から osc(open sound control) 経由で openframeworks に取得し動作解析を行う (図 22).



図 20 orphe モジュールから取得可能な値



図 21 hubapp

osc とは、電子楽器やコンピュータなどの機器において音楽演奏データをネットワーク経由でリアルタイムに共有するための通信プロトコルである。サウンド系アプリケーションの Max/MSP, Pure Data (pd) やビジュアル系アプリケーション Processing, OpenFrameworks, ハードウェア iPhone / iPad + OSC を送受信するアプリとの連携が可能で, orphe モジュールも以上にあげたアプリと連携可能である。

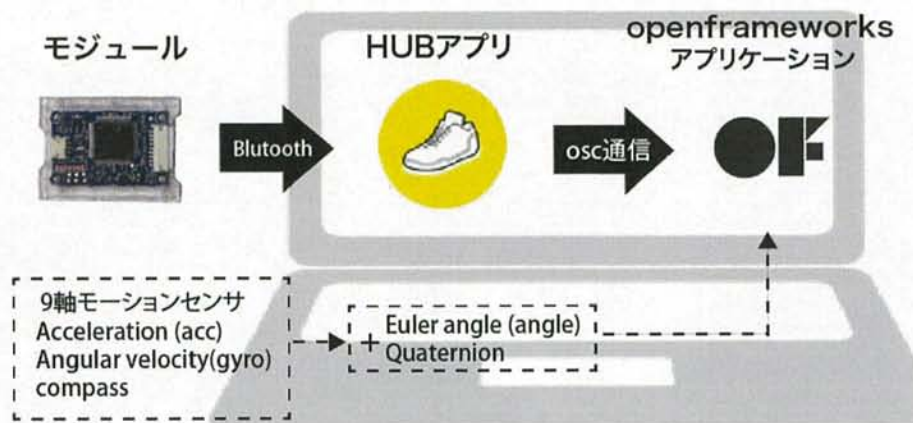


図 22 システム構成

■録画再生アプリケーションの制作 開発コストを下げるため、モーションデータは動画像と合わせて保存され、プログラム場で再生やデータの考察が可能となるアプリケーションを制作した。本アプリケーションは、record mode と play mode がある。record mode(図 23) では、スペースキーを押下することでセンサ値とカメラ画像の録画を開始し、再びスペースキーを押下することで録画の停止をおこなう。録画したデータはアプリケーション内のファイルに保存される。図 23 の ① はクオータニオンの値に対応して回転する 3D モデル、② はカメラのキャプチャ画像、③ は各センサ値のグラフである。なお、本システムでは一秒間に 50 回 (20msec) でセンサ値の書き出しを行なっている。



図 23 録画面面



図 24 録画風景

play mode(図 25) では録画したデータの再生を行える。再生は録画データを保持しているファイル内からアプリ画面にドラッグを行うことで再生される。また、録画直後に playmode へ切り替えると直前に録画したデータの再生をおこなう。再生時はスペース

キーでおこない、動画像と共にセンサ値を見比べることが可能である。time バーをドラッグすることで任意の時間からの再生が可能で、s キーを押すことでスロー再生も可能である。本アプリケーションを用いて動作の録画をおこなった。図 25 の①はクオータニオンの値に対応して回転する 3D モデル、②はセンサ書き出しと同タイミングで書き出した動画像、③は各センサ値のグラフである。なお、本システムでは一秒間に 50 回 (20msec) でセンサ値の書き出しを行なっている。



図 25 再生画面

3.3.2 動作解析

スケートボードの基本のトリックであるオーリー、ショービット、チックタックに焦点を絞ってモーションデータを取得しその特徴を見た。今回は上記の録画と再生がおこなえるアプリケーションを用いて、著者と学内の友人にトリックを行ってもらいデータを収集した。

● オーリー

オーリーはボードとともにジャンプをする技である (図 26)。オーリーはボードの前方をあげると同時に後方を地面に叩きつけることでジャンプをおこなう。ジャンプ後に縦回転や横回転を加えるトリックの基礎として知られている。派生技がもっとも多くト

リック習得の一番の難関であり、この技ができるとトリックの幅が広がる技でもある。



図 26 オーリー photo by Cristian Navarrete

オーリー時の angleX は通常時が 0° なのに対し、地面を叩きつける時 (②) に 25° , 最高到達地点 (③) で 42° となった。また、叩きつける時、着地時 (④) は accZ (地面と垂直方向) がマイナスに変化する様子がわかる。

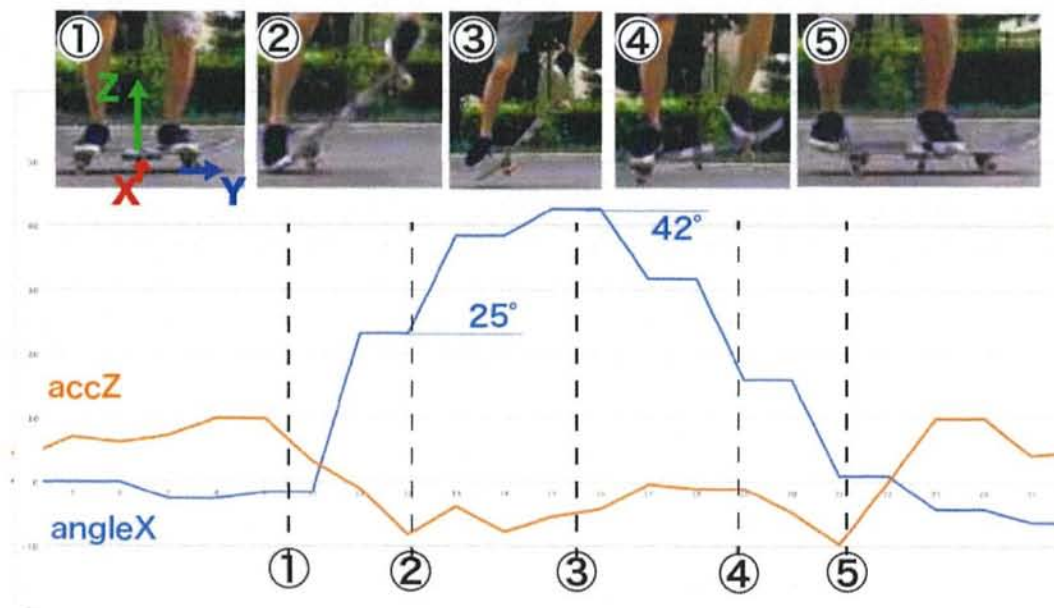


図 27 オーリー時のグラフ

- ショービット

ショービットは後ろ足でデッキのテール部分を軽く踏み込むことで回転をかけ、ボードを 180° 回転させる技である (図 28)。デッキのテールとノーズを入れ替えるために使ったり、 360 回転させるトリックなど、多くの種類の回転系トリックの基礎になる重要な技である。



図 28 ショービット

angleX はトリック前は 0° なのに対し、回転時に徐々に上がり、最高到達地点では 35° に達し、着地時に再び 0° となった (図 29)。また、angleZ は 0° から 180° へと徐々に変化した。

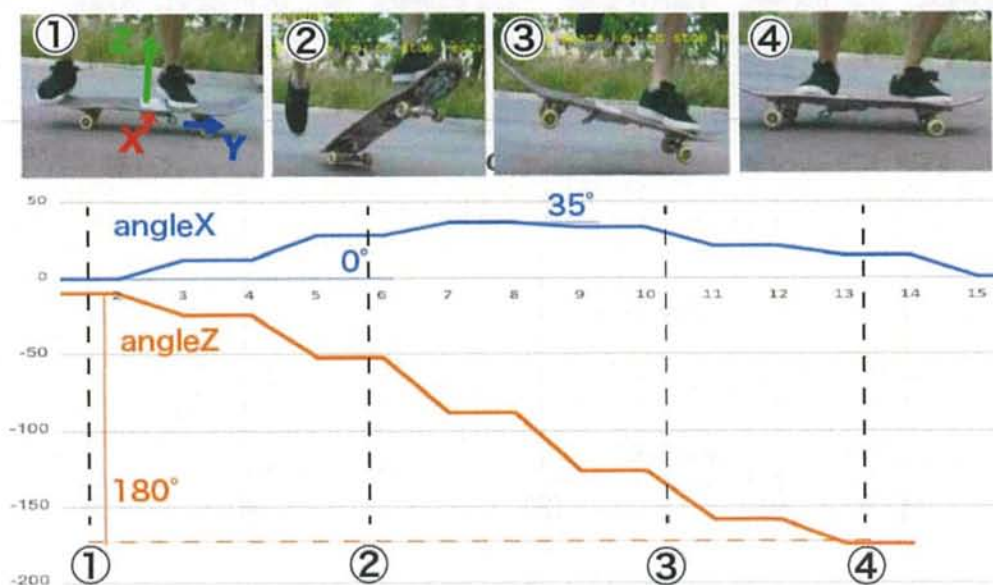


図 29 ショービット

● チックタック

チックタックはボードを左右に振りながら前に進むトリックである(図30)。ボードを左右にコントロールする基礎と呼ばれている。近年子供が乗っているのを見かける2輪のスケートボードはこのチックタックの動きを行なっている。



図30 チックタック

図31はチックタックの一部を抜き出したものである。左→右の順番でチックタックを行なっている。左に動かすときはangleXの値が上がり右にボードを動かしているときはangleXの値が下がっていることがわかる。また、angleXに着目すると左右に移動する時にプラス方向(前あげ)になり、移動し終える時にマイナス方向(前下げ)になった。これはボードを左右に動かす際にノーズ(前方)を浮かすことによるものである。

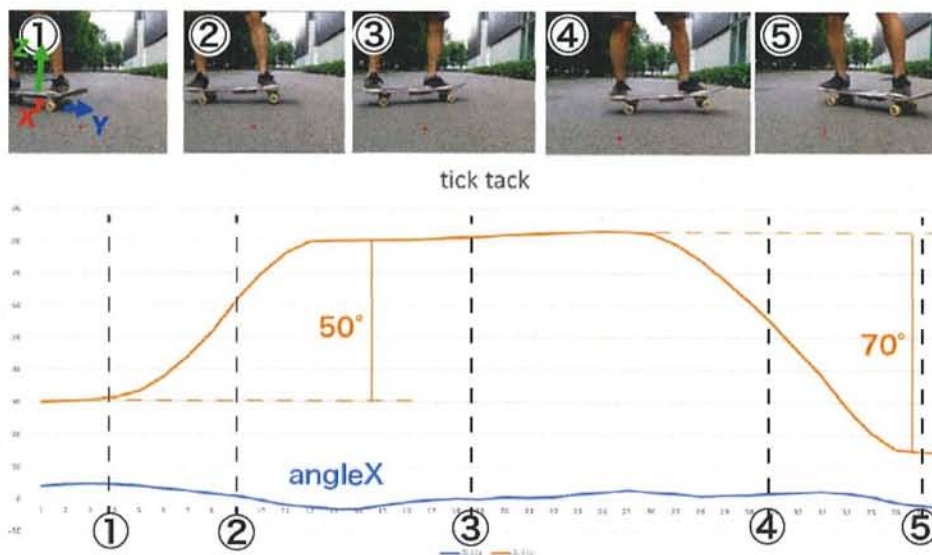


図31 チックタック時のグラフ

動画解析を経てトリックに共通する特徴を得た。(図 32)

- 進行方向に対してまっすぐに着地をするため、トリックを始める時と終わる時の angleZ の差は 0° か 180° 回転であること
- トリック時にはテール(後方) か ノーズ(前方) を上げるために、 angleX に動きがあること
- ジャンプ時や着地時には accZ (垂直方向) に力が加わること
- angleY は重心のぶれを表すこと

トリックの特徴



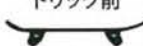



トリック前と後は angleZ が 0° か 180° 回転であること	<div>トリック前</div>  <div>トリック後</div> 
トリック時には angleX に動きがあること	<div>トリック前</div>  <div>トリック後</div> 
着地時には accZ (垂直方向) に力がくわわること	
angleY はぶれ, ずれ	

図 32 解析から得たトリックの特徴

3.3.3 アプリケーション制作

■機能概要 以上であげた認識手法を用いてスケートボード初学者支援アプリケーションを開発した。本アプリケーションの使用手順を以下に示す。

- ① モジュールをボードに取り付ける
- ② トリックを iPhone や iPad で撮影する
- ③ アプリが上達のヒントをくれる



図 33 アプリケーションの使用手順

モジュールの取り付けを容易にするため、3D プリンタや木材を用いて治具を制作した(図 34)。治具はスケートボードに付いているボードとトラック部分の間に挟みネジを締めるだけで固定できるようにした。また、トリックに支障をきたさぬように、底面に取り付けをおこなえるようにした。スケートボードは縦の衝撃が強いため、デバイスは横から入れるようにし、トリック中に外れるリスクを減らした。光による拡張のためにフルカラー LED テープ (WS2812) を搭載した。[重量 100g , サイズ 520mm × 75mm × 28mm]

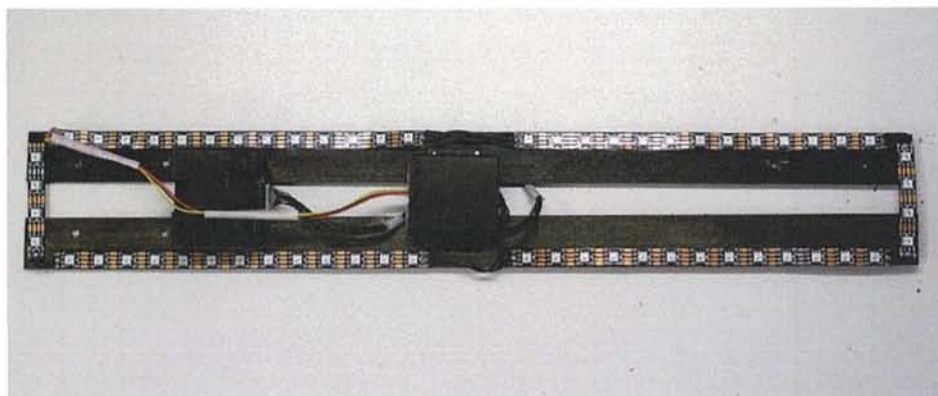


図 34 治具

本アプリケーションは〈録画モード〉〈再生モード〉〈比較モード〉〈LEDモード〉の4つで構成されている。

録画モードでは、画面をダブルタップで録画開始、終了ができる。録画後にはトリック認識を用いてトリックの候補を自動で選出し、ユーザは行なったトリックが正しければokボタン、間違っている場合は該当するトリックを選ぶことで、トリックごとにフォルダを分け保存をおこなう。

再生モードでは、画面をタッチすることで再生したいトリックを一覧より選ぶことができる。また、比較モードでは、二つのトリックを選択することで、同時に動画像とセンサ値と3Dグラフィックスの再生をすることができる。また、動作認識を利用することで、自動でトリックタイミングを合わせ再生をすることが可能である。

LEDモードでは、LEDの点灯パターンや色を選択して光らせることができる。また、インタラクティブモードでは、動きに対応して光のパターンや色を自動で切り替えることが可能である。



再生モード



録画モード



比較モード



LEDモード

図 35 アプリケーション画面

■上達支援システム アプリケーションが提示する上達支援のための情報は、主に・データの可視化及び独自の知見を生かしたアドバイス・トリックデータのユーザの過去やプロスケーターとの比較である。

● データの可視化

保存したデータは選択画面から選択することで見れる。また、技ごとにフォルダが分けられているため、ユーザは手間をかけずに該当するデータを見つけることができる。再生時には3Dグラフィクスより、ボードのみの詳細な動きを把握でき、また3Dグラフィクスは指でドラッグすることで任意の角度から動きを追うことができる。また、各センサ値からは、X,Y,Zの軸ごとの角度や加速度の情報を見ることができるため、重心のズレや、跳ね上がり時の角度、ジャンプ時の叩きつけの強さ、ボードの回転スピードなどが精確な数値をみることができる。(図36)。

角度 (angle)	<ul style="list-style-type: none"> ・X → ボードの傾け具合 ・Y → 重心のぶれ ・Z → 回転の具合 
加速度値 (acc)	<ul style="list-style-type: none"> ・X → 重心のぶれ ・Y → 漕ぎの強さ ・Z → 叩きつけの強さ 
角速度 (gyro)	<ul style="list-style-type: none"> ・X,Y,Z → 回転の速さ 

図 36 データの可視化でわかること

● プロや過去のデータとの比較

過去のトリックデータやプロのデータとの比較することで、ユーザの弱点を詳細にわかる。ユーザが比較したいデータを選択することで、容易に比較可能な仕組みをつくるた

めに 動画中のトリック部分のみの切り取り, 及びトリックごとに保存することで, 比較したい二つのトリックデータのトリックタイミングを合わせて再生することを目指した.

■トリック部分の切り取り, 及びトリックごとに保存

[認識手法の検討]

動作解析で得た情報を元に角度 (angle) の X,Y,Z を用いて認識手法の検討を行なった. はじめに k-NN を用いて認識を試みた. あらかじめ記録した各トリックの成功時の各 angle 値 25 個ずつをテンプレートとして用意し, 入力データと各テンプレートの距離を比較し, 最も合計距離が近いものをその時のトリックとみなす手法を用いた. 数式 (1) の D が距離の合計, i がテンプレート数 (今回は $i=0 \sim 4$), (2) はテンプレートデータ, (3) が入力データ, (4) の n がデータ参照数 (今回は $n=25$) である.

$$\operatorname{argmin}_i D_i \quad D_i(T_i, S) = \sqrt{\sum_{k=0}^n (T_{i,k} - S_k)^2} \quad (1)$$

図 37 k-nn の式

人によりトリックにかかる時間が違うために, 1 次曲線を並行移動させて数値の類似度を計る k-NN では, 誤認識がおこってしまう可能性を考え, 長さの違いにも対応可能な DTW を用いた. 数式 (2) の記号は (1) と同様である.

$$DTW_i(T_i, S) = \min \sum_{k=0}^n |T_{i,k} - S_k|$$

図 38 DTW の式

[認識テスト]

認識率をみるためにテストをおこなった。

技	技回数	認識した回数	成功率
ollie	14	11	78.6%
shove it	10	3	30.0%
tick tack R	14	9	64.3%
tick tack L	14	7	50.0%

図 39 認識成功率

表(図 39)はトリックごとの認識成功率を示したものである。技により認識率にばらつきが見られた。また、認識しないだけでなく誤認識をする場合も見受けられた。認識が失敗する原因として、テンプレートを取得したトリック記録の成功度合や、テンプレートを取る範囲の妥当性が挙げられる。また、人によりトリックの癖があることも挙げられる。

[認識のアプリケーションへの応用]

DTW 認識を用いて、トリック部分のみを切り取る仕組みを制作した。録画中に最も連続認識数の多かったトリックをその動画内でのトリックであるとし、録画後に候補トリックとしてユーザに提示し、該当するトリックを選択してもらうことで、トリックをフォルダ分けし保存することとした(図 40)。また、トリック部分だけ切り取るためにスライダーを用意し、切り取りの始めと終わり部分を選択でき、アプリケーションはその始まりと終わりのポイントを候補として提案する(図 41)。動画全体ではなくトリック部分のみを保存することで、データ容量を取らないことも目的の一つである。



図 40 トリックの候補を提示中の画面



図 41 終わりのポイントを選択できる画面

■比較したい二つのトリックデータのトリックタイミングを合わせて再生 DTW の仕組みを用いてトリック中の各動作タイミングを合わせ再生，比較ができるようにした。また，DTW はテンプレートとの対応した各点からのそれぞれの距離を測るため，距離が一定距離離れている箇所を赤くし，テンプレートとどこが違うのかをわかりやすくした。



図 42 比較している画像

■LED モード 本アプリは LED モードを搭載している。モードは，光選択モードとインタラクティブモードの二つがある。光選択モードはもともと用意された複数の LED の発光パターンの選択と RGB による色の選択をおこない，常に点灯するモードである。

インタラクティブモードは，動作認識を用いて，動作ごとに発光パターンや色を変えることが可能である。



図 43 LED 色選択画面

4 車椅子への応用事例

次に、首都大学東京の車椅子プロジェクトに参加し、《NEO SKATE 2》のシステムを車椅子に応用し、パフォーマンス表現の拡張に取り組んだ《NEO WHEEL CHAIR》の開発について報告する。

4.1 車椅子基本情報

車椅子は、歩行機能に障害のある者に対して歩行機能を代替する役割をもつ。これまで車椅子における研究は、その移動機能の向上を目的としたものが多い。一方で、車椅子ユーザーの生活の質の観点からの発展も取り組まれており、車椅子バスケットボール、車椅子ラグビーなどのスポーツや車椅子ダンスなどの表現方法に特化した車椅子開発も行われている。2020年のパラリンピック、障害者差別解消法、ダイバーシティの推進など、社会参画の為の障害を取り除く試みが行われている中で、センサなどのテクノロジーを用いて車椅子に新しい価値を付加することで、車椅子ユーザーの生活の質の向上に取り組む活動が積極的に行われている。本研究では、生活の質の向上を目的としており、9軸モーションセンサを用いて、健常者が自由に踊るように車椅子でも自由に表現可能なシステムの提案をおこなう。

4.2 先行研究

車椅子にテクノロジーを応用した研究は①車椅子周辺環境の解析を行う研究②車椅子の動作解析を行う研究、として分類することができる。例えば前者に関しては、岩澤ら[8]は、電動車椅子の振動を取り付けた3軸加速度で地面状況を図りGPSで得た位置情報を元にマッピングすることで、路面情報の記録をし車椅子利用者の道選びに役立てる研究を行っている(図44)。このように車椅子周辺環境の解析を行う研究は、安全面の向上を目指したものが多い。

一方で車椅子の動作解析を行う研究はレクリエーションや表現手法など、エンタテインメント要素を含むものも多く見られる。Kathrinら[9]はkinectを用いて車椅子の前後左右を認識しゲームのコントローラとして使用することで、アクセシビリティ性の向上をはかる研究がある。望月ら[10]は、タイヤに角速度センサを取り付け、回転速度を図りタイヤをDJのディスクとみたと、音楽の再生をコントロールすることで、車椅子に乗る楽し

みを向上する研究を行っている(図45).



図44 岩沢らの路面情報をマッピングしている様子



図45 dj 車椅子

4.3 《NEO WHEEL CHAIR》の開発

4.3.1 システム概要

スケートボードと同様に録画と再生が行えるアプリケーションで動作の記録および解析を行う。モジュールは木をレーザーカッターで加工した治具を用いて座椅子の真下に取り付けた(図46)。漕ぐ動作などは直接車輪にジャイロセンサを取り付け測るのが確実であるが、中央に取り付けたセンサのみの解析が可能であるか検討したいと考え、orphe モジュールのみの使用を決めた。



図46 車椅子へモジュールを取り付けている様子

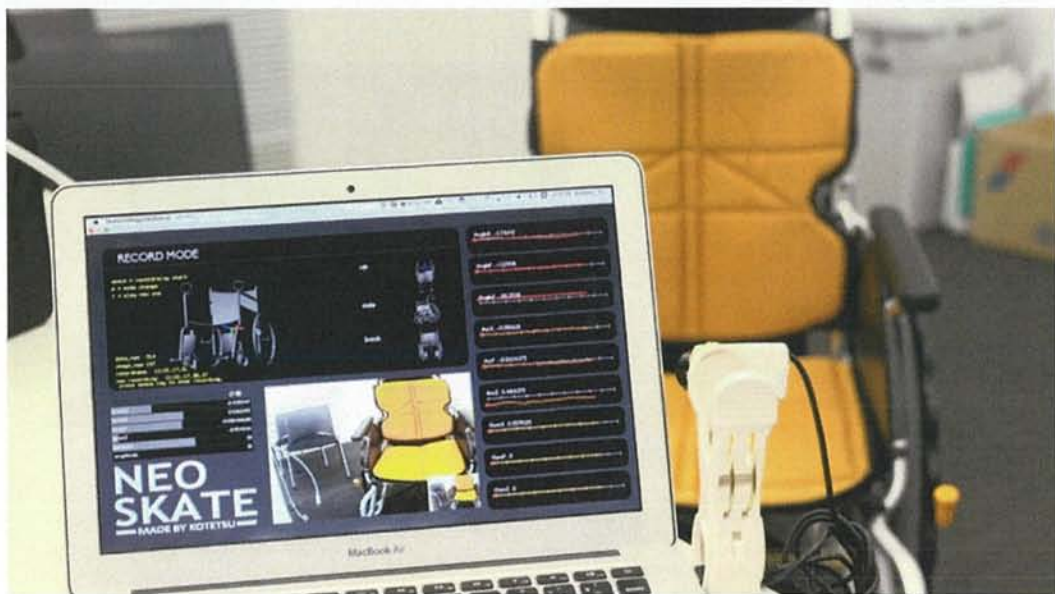


図 47 録画風景



図 48 再生画面

4.3.2 動作解析

日常使いの車椅子でおこなえる動作である、走行、ブレーキ、回転、叩打、の4つに着目をし解析を行った。なお、本システムでは一秒間に50回(20msec)でセンサ値の書き出し、同タイミングで画像(キャプチャ)の書き出しを行っている。図49に各値の軸を示す。角度のZは変化量を表している。



図 49 車椅子と軸の対応

● 走行

5m の区間を時間を計測し走らせた。走行① (2.3km/h) と走行② (4.4km/h) の2種類に分け動作の記録し、特徴を見た。図50に走行①, 図51に走行②時の加速度X,Y,Zのグラフを図示する。通常時の値がXは0°, Yが0°, Zが0°。走行①時の操作者が車輪を回転させ始めた時に、各acc値の変化が大きくなりその後徐々に元の値に近づいていくことを確認した。走行②においては、車輪を回転させ始めた時にaccYの値が+側に大きく動くことがわかった。また、走行②を時間tの時の加速度値 a_t の前後 $(k-1)/2$ 個(実験時は $k=5$)($a_{t-2}, a_{t-1}, a_t, a_{t+1}, a_{t+2}$)を足して定数kで割る平均化を行ったところ(図52), 一定の周期性が見られた。

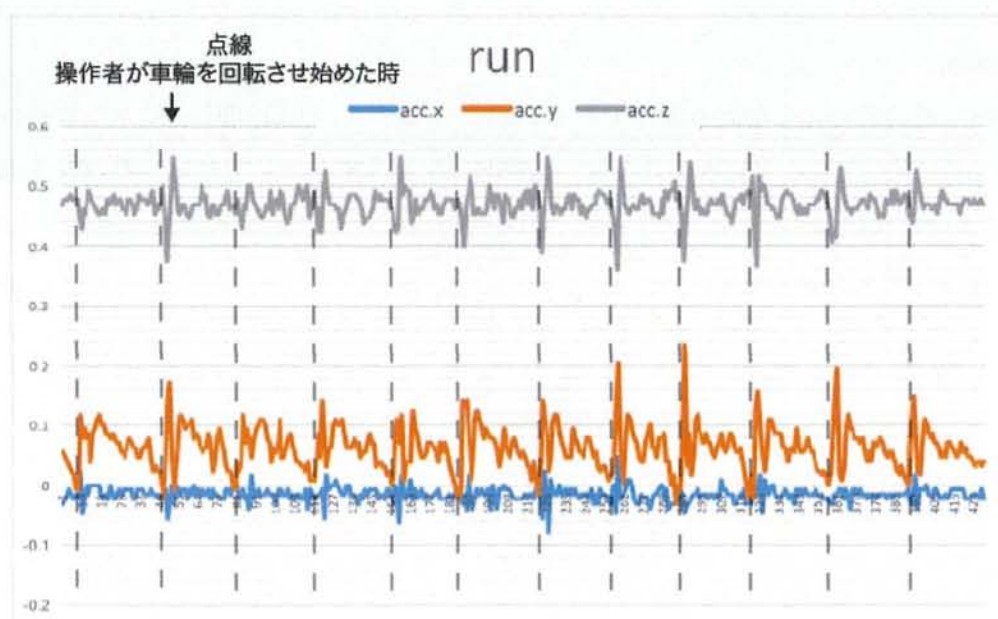


図 50 走行①のグラフ

その他の値で angleX にも周期性が見られた。図 53, 図 54 は, Y 軸の加速度と X 軸の角度の値をグラフにしたものである。走行①時と走行②時で車輪を回転させ始めた後に angleX の値が大きく下がることわかった。また, angleX は止まった状態で 0° なのに対し, 走行時は基準値が上昇していることがわかる。これは車輪の回転による慣性の法則の影響で, モジュールを取り付けた本体が傾くことが原因として考えられる。



図 51 走行②のグラフ



図 52 走行②の平均化を行なった後のグラフ

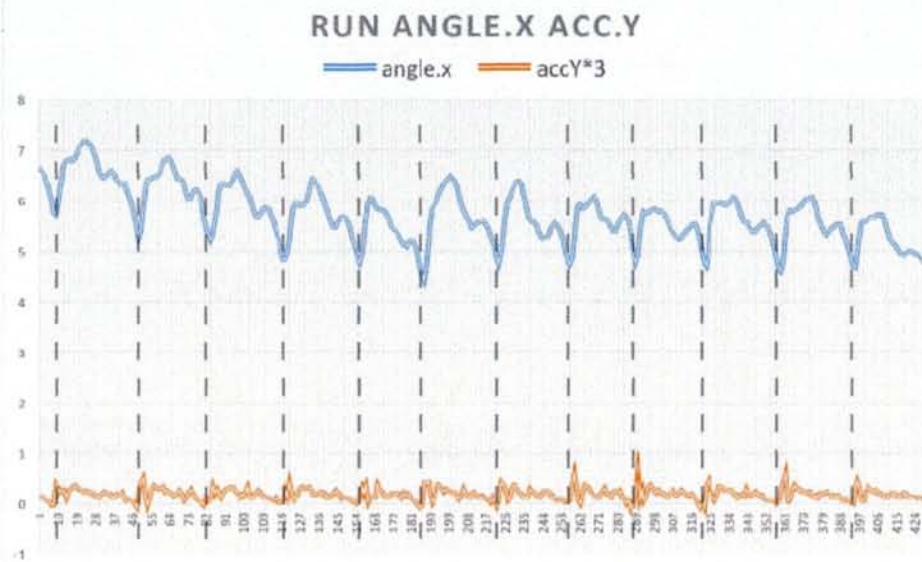


図 53 走行①時の角度と加速度を比べたもの

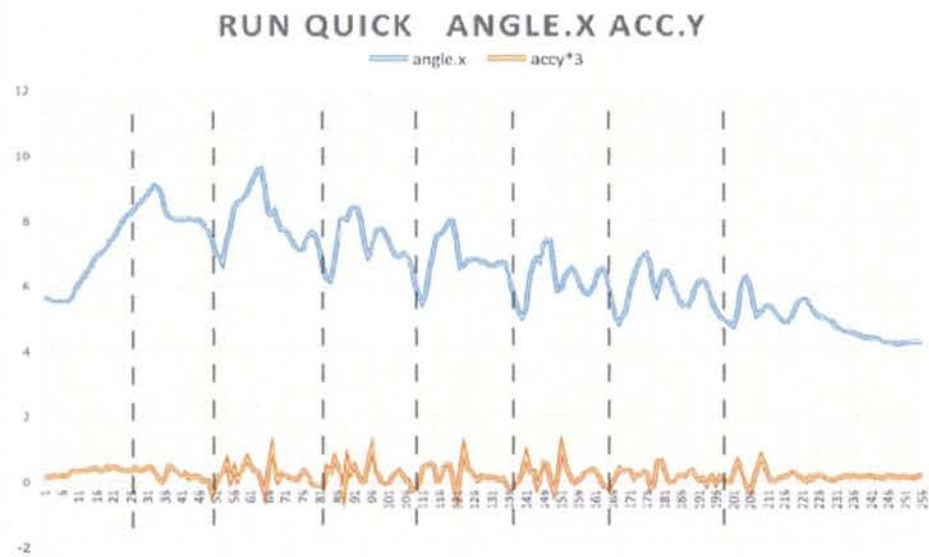


図 54 走行②時の角度と加速度を比べたもの

● ブレーキ

ブレーキ時は accY が方向 (後方) に動く。また、様々な床での走行時と停止時の angleX を比較した (図 55, 水→途中で停止, 赤→絨毯走行①, 灰→絨毯走行②, 黄→コンクリート, 青→20cm × 20cm のブロック, 緑→8cm × 15cm のブロック)。各々走行中にはある一定の数値帯に収束していることがわかる, 停止時 (水色) は停止時に大きく値が下がっていることがわかる。走行時と同様に慣性の法則が原因とみられる。accY か angleX を用いて走行と停止の認識が可能であると考えている。

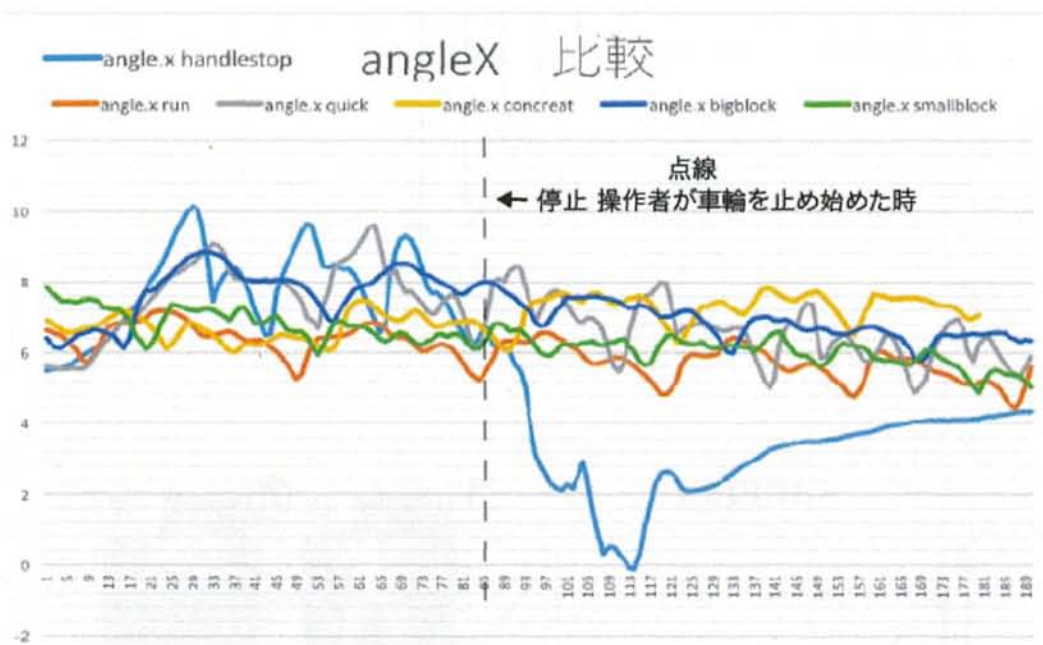


図 55 各走行時と途中でブレーキを行なった時の角度の比較をしているグラフ

● 回転

回転はその場で右方向に回転する動作と走行中に 90° 回転する動作の二つを記録した。図 56 と図 57 に angleZ のグラフを図示する。angle の値は-180° から 180° の範囲である。回転に関しては angleZ で揺れの影響をほとんど受けることなく測ることが可能であった。

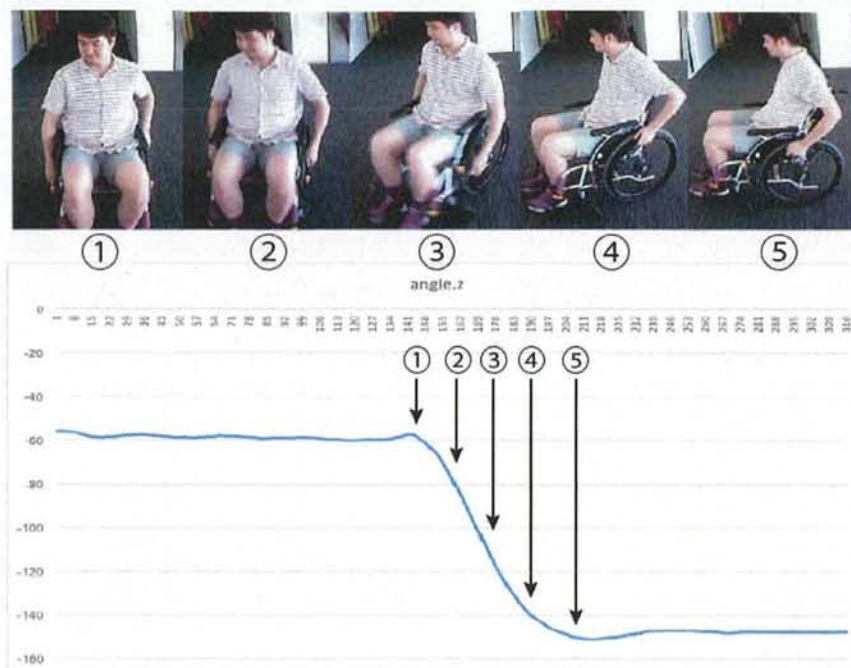


図 56 走行中に回転を行なっている時の angleZ のグラフ

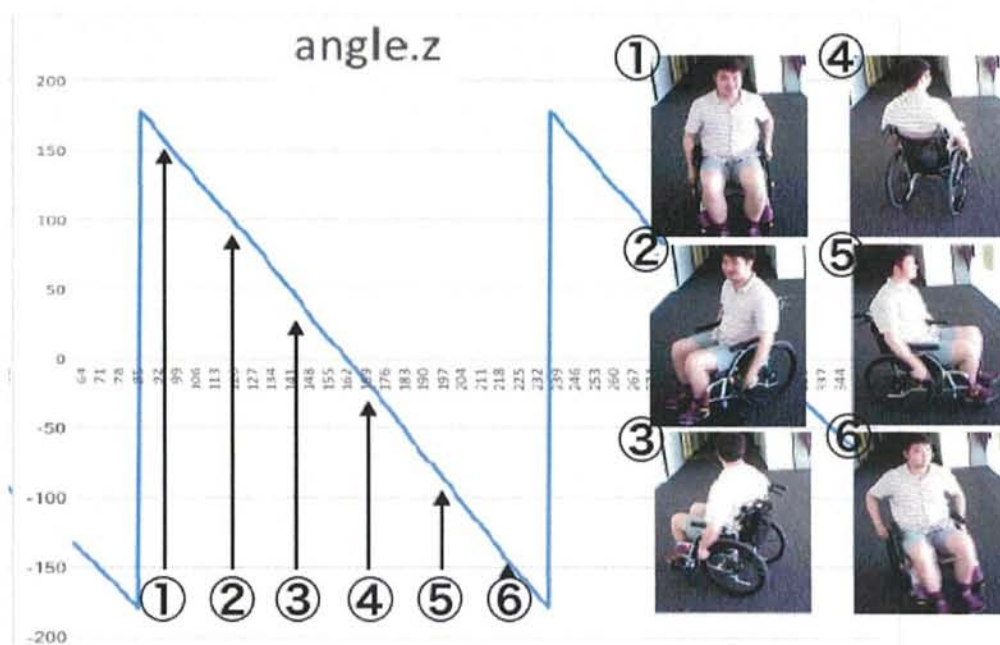


図 57 右回り回転を行なっている時の angleZ のグラフ

- 叩打

車椅子の肘掛けを叩打する動作を記録した。図 58 はその時の垂直方向の Z 軸の加速度 (accZ) のグラフである。叩打した時に大きく値が変化をしていることがわかる。また、accZ に大きく影響を与えると考えられる段差を乗り越える時と、肘掛けを叩いた時の accZ の絶対値を比較すると、叩いた時の値の方が大きく変化していることがわかった。

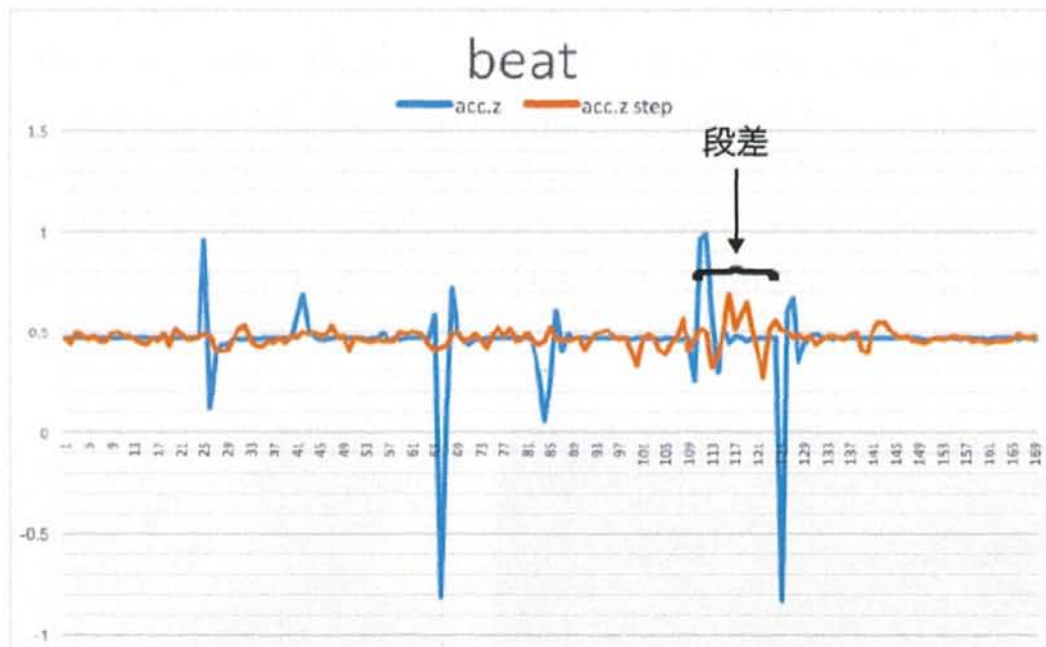


図 58 叩打時の accZ のグラフ

4.3.3 アプリケーション制作

今回動作解析をおこなったうちの3つである、走行、回転、叩打に対して認識が可能であるか確かめるために、各々に機能をつけ動作に連動し 3D グラフィクスが動き音を鳴らすアプリケーションの開発を行った (図 59)。回転の変化量が閾値を越えると音がなり、変化量に比例してボリュームが変わる。また、肘掛けの叩打、走行にはそれぞれに対応した音が鳴るアプリケーションを制作した。

回転に関しては angleZ を用いて正確に角度を認識し、さらに回転の速さ、右回り左回りの認識が可能であった。また、肘掛けを叩く動作も accZ に閾値を設けることで正確に認識可能であった。今回は漕ぐ動作に対して角度 X, Y, Z 軸に着目し DTW を用いて認識を試したが、認識が成功する度合いのばらつきや止まった状態からは認識できるが動いた状態で漕ぐと認識できない場合があった。これはテンプレートを取得した元データの適切性や角度を用いたことの適切性の問題や、デバイス取付時の角度の微妙なずれが原因とみられる。



図 59 音と 3d グラフィクスによるアウトプットを行なっている様子

4.3.4 展示

2017年10月に日本科学未来館にて行われた DCEXPO で首都大学東京の車椅子プロジェクトとして展示を行った。大人から子供まで幅広い世代に体験していただき意見や感想をいただいた。誰でも車椅子に座るだけで体験できることや、どの車椅子にも応用可能な点や健常者に車椅子を体験していただくきっかけとして良い、車椅子で活動をしたくなるなどの高評価を多くいただいた。問題点として、今までは筆者の動きに合わせて閾値を設けるなどして、動作するようにプログラムを調整していたが、子供や女性の場合は力が弱いために認識が難しくなることや、認識後に音をアウトプットするために若干の遅延が発生し違和感を感じる事が挙げられた。



図 60 展示風景 ①



図 61 展示風景 ②

5 展望

今後の展望として、以下の3つが挙げられる。

- 動作認識精度の向上
- アウトプット手法の検討
- 動作解析、認識、アウトプットまでの流れの一元化

まず今後の展望として、動作認識精度の向上の必要性が挙げられる。実験を通して動作により認識成功率にばらつきが見られた。本稿では角度に絞ってDTWや閾値を用いて認識をおこなったが動作によって特徴のあるパラメータが違うために、加速度や角速度など他のパラメータで正しく認識可能であるかを検討する必要がある。また、DTW認識では著者の動作をテンプレートとして使用したため、他の人が動作を行った際に適用できない可能性がある。より多くの人に認識を適用するためには、多くの人のデータを取得しテンプレートの種類を増やすことが不可欠である。また、テンプレートデータは各25個としたが、数の違いやテンプレート取得範囲での違いを検討する必要も見受けられる。本稿では、スケートボードは光によるアウトプット、車椅子では音と3Dグラフィクスによるアウトプットをおこなったが、映像などのその他のテクノロジーを用いたパフォーマンス表現への応用を検討していきたい。また、スケートボードでおこなった初学者支援アプリケーションのように、パフォーマンス表現以外での応用も検討していきたい。

最後に、動作解析からアウトプットまでの流れの一元化をおこないと考えている。今回は動作の特徴を捉え認識手法を検討したが、一つの動作を複数回おこなうことでテンプレートを制作し、動作データ複数集め、DTWを用いて識別することで、認識が可能であるため、この流れを一元化することでどの動作にも対応したシステムの制作が行える。本システムは素早い動きのスケートボードと素早い動きではない車椅子の動作を捉えパフォーマンスの拡張が可能であり、本稿で着目した二つ以外の物体にも応用可能である可能性を示唆した。つまり、9軸モーションセンサを取り付け動作を複数回記録するだけで、どのようなスポーツや日常の動作においても認識を用いたアウトプットが容易に行えるシステムの制作が可能ではないかと考えている。

- スケートボード

スケートボードトリックの動作の記録、および解析で得た特徴を用いて初学者支援アプリとLEDの発光パターンの操作をおこなうアプリケーションの制作をおこなった。今回著者自身が初学者であり、トリックの練習をする中で録画をおこない見返すことで気づいた点が複数あった。また、気づいた点を注意することでスキルアップにもつながった。この体験を生かし、独自のポイントでアドバイスを行える初学者アプリケーションの制作を進めていきたい。スケートボードトリックは縦、横回転の組み合わせから、技をおこなうスポーツであり、その規則性を分析することでより上達に役立つアドバイスが見つかると考えている。

初学者アプリケーションについては、トリックをオンラインでシェアすることで、多くの人の評価や、比較を行い、より上達のヒントを得られるようにしたい。

● 車椅子

日常で行える動作の記録、および解析で特徴を得て、特徴を用いて音と3Dグラフィクスでアウトプットをおこなうアプリケーションの制作をおこなった。

本システムで用いたnmfモジュールは素早い動きでも対応が可能であるため、スポーツ車椅子など激しい動きのパフォーマンスの解析がおこなえる

また、健常者が自然に踊るように車椅子ユーザにも自由に表現をおこなえる、エンタテインメント表現の拡張を行える可能性を見出した。

また、今回は車椅子の動作解析に取り組んだが、地面の状況や段差認識などの車椅子周辺の環境解析にも応用可能であると考えている。

これらの取り組みを通して、車椅子ユーザにより表現の幅をひろげてもらい、健常者に興味を持ってもらいたい。

6 結論

本研究では、パフォーマンスの拡張をテーマに3つの作品の制作をおこなった。《NEO SKATE》では、スピードや曲がり度合いを計測し、走行状態に合わせ取り付け付けたフルカラーLEDの発光を変化させることで、走行状態のパフォーマンス表現を拡張した。また、《NEO SKATE 2》では、9軸モーションセンサを用いてトリック時の動作を計測及び解析をおこない初学者支援アプリケーションの制作をおこなった。《NEO WHEEL CHAIR》では本システムを車椅子に応用し、車椅子動作に対応して3Dグラフィクスや音を変化させるアプリケーションの開発を行った。また、《NEO WHEEL CHAIR》は、展示会に出展し多くの方に体験をしていただき高評価を得ることができた。スケートボードはもともと高いパフォーマンス性を持ち、そのパフォーマンス性をさらに拡張しうる可能性を示唆し、車椅子においては、パフォーマンス性が高いものとは言えないが、本システムを用いてデジタル表現でアウトプットすることでパフォーマンス性の拡張を行えた。以上から、本研究の目的であった動作解析を用いたパフォーマンスの拡張が可能であることを示唆した。

本システムは、今回取り上げたスケートボードと車椅子以外にも容易に応用可能であると考えている。また、動作をメディア変換することで、新しい体験を生み出せることが可能なことや、データを蓄積することで新たな発見ができることがわかった。

今後の展望として動作認識精度の向上とアウトプット手法のさらなるブラッシュアップと検討、動作解析からアウトプットまでの流れの一元化をすることで、様々な動きに対してパフォーマンスの拡張が可能なシステムの構築をしていきたいと考えている。

謝辞

本論文は著者が首都大学東京大学院システムデザイン研究科システムデザイン専攻インダストリアルアート学位記博士前期課程において、インタフェースデザインスタジオでの研究成果をまとめたものである。同専攻馬場哲晃准教授には指導教官として日頃の研究指導や学会発表等数々の頼りあるご指導とお力添えをいただきました。知識が乏しく技術面で何度も行き詰まる僕に根気強くご指導してくださり、心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。並びに同専攻串山久美子教授、金 教授には袂紗として発表ごとにご助言と論文の細部に至るまでご指導いただき、本論文をよりよいものにすることができました。本当にありがとうございました。そして、同研究室及びインタラクティブアートスタジオの皆様には、日々多くの助言をいただけたことをありがたく思います。最後に、大学院進学を支援してくれた家族、相談にのってくれた友人、知人の皆様に感謝の意を込めて謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] Jean-Christophe Eloy, 2011/04/21, MEMS デバイスの進化はどこまでいくのか?, <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/COLUMN/20110410/191000/?P=2>, 2018/1/2
- [2] 2016/08/03, 【スポーツ庁】2025 年までにスポーツ産業 15 兆円へ, 一番の商機は?, <https://womanslabo.com/20160803-5>, 2018/1/5
- [3] B P 速報, 企業の I T 予算は「過去 10 年で最高」I o T が追い風, 2018/10/6, <https://www.nikkei.com/article/DGXMZO21970510W7A001C1000000/>, 2018/1/3
- [4] Sebastiaan Pijnappel and Florian 'Floyd' Mueller. 2014. Designing interactive technology for skateboarding. In Proceedings of the 8th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction (TEI '14). ACM, New York, NY, USA, 141-148. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2540930.2540950>
- [5] Edward Reynell and Hannah Thinyane. 2012. Hardware and software for skateboard trick visualisation on a mobile phone. In Proceedings of the South African Institute for Computer Scientists and Information Technologists Conference (SAICSIT '12). ACM, New York, NY, USA, 253-261. DOI=<http://dx.doi.org/10.1145/2389836.2389866>
- [6] Design i/o <http://design-io.com/projects/Skataviz/>
- [7] 外山貴彦 Interactive mapping for sk8, 2014 <http://www.nzu.ac.jp/blog/digital/archives/12134>
- [8] 岩澤有祐, and 矢入郁子. "3 軸加速度時系列データからの車椅子走行行動分析の研究." The 26th Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence. 2012.
- [9] Gerling, Kathrin M., Michael R. Kalyn, and Regan L. Mandryk. "KINECT wheels: wheelchair-accessible motion-based game interaction." CHI'13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems. ACM, 2013.
- [10] 望月茂徳: 車椅子 DJ: 車輪回転速度に連動した音楽再生車椅子の開発, 情報処理学会研究報告, Vol. 2016-ARC-183, No. 1, pp. 1-3, 2016

付録 A 学外発表

国内会議

スケートボード

- adada 2015
- ec 2015
- インタラクション 2016
- adada japan 2017

車椅子

- acc2017
- インタラクション 2018